

Images thermiques infrarouges (IRT)

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Échelle de temps		Niveau informations nécessaires	Coûts (€)		Coûts (temps)	
	Description des données	Seuil d'interprétation	Aire d'interprétation	Pas de temps Résultats	Pas de temps Données		Terrain	Bureau Labo	Terrain	Bureau Labo
										
Nappes libres Zone hyporhéique Milieux carbonatés	Ponctuelles	<100m	Tronçon de cours d'eau voire masse d'eau	Instantané (t) Saisonnier (Δt)	Instantané	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Fort

Formule de calcul

L'émission énergétique totale émise par un objet (M en $W.m^{-2}$) est fonction de sa température et peut être exprimée par la loi de Stefan-Boltzman :

$$M = \sigma T^4$$

où T est la température absolue en Kelvin et σ la constante de Stefan-Boltzman qui est de $5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$.

Cette loi concerne les corps noirs, objets physiques idéaux qui absorbent toute l'énergie qu'ils reçoivent. Les matériaux réels se comportent différemment des corps noirs. Ils n'émettent qu'une fraction de l'énergie qu'émettrait un corps noir. Cette propriété physique s'appelle l'émissivité ϵ (ϵ = émissivité énergétique d'un objet à une température donnée/ émissivité énergétique d'un corps noir à cette même température)

En imagerie IRT, l'émission énergétique (M) est mesurée sur une gamme de longueurs d'onde. Elle est utilisée, avec l'émissivité (ϵ) pour calculer la température de surface de l'objet étudié.

Description rapide

En mesurant le rayonnement dans le spectre électromagnétique de l'infrarouge thermique, la télédétection IRT permet d'obtenir une cartographie de la température de surface des cours d'eau (Torgersen *et al.* 2001) à différentes échelles spatiales (Handcock *et al.* 2006) selon les images utilisées (par ex. images satellites, images aéroportées). À large échelle, cette méthode peut, par exemple, permettre d'identifier les effets thermiques des affluents, des barrages et des centrales nucléaires sur un cours d'eau. À fine échelle, il est possible de distinguer les arrivées phréatiques associées aux bras morts et aux résurgences latérales (Dugdale *et al.* 2013). La télédétection IRT permet de mieux appréhender les structures spatiales de température sous réserve de contrastes thermiques suffisants.

Principe de caractérisation des échanges

Une image infrarouge thermique est un enregistrement de la température de surface. Contrairement aux photographies pour lesquelles la mesure s'effectue dans le spectre électromagnétique du visible, l'acquisition des images thermiques est réalisée dans l'infrarouge thermique (encart : Formule de calcul), souvent dans l'infrarouge moyen ou lointain (figure 22 page suivante). Le rayonnement IRT est mesuré par un capteur thermique à partir du sol ou embarqué par des vecteurs aéroportés (avions et drones) ou satellitaires. La télédétection IRT a ainsi l'avantage de pouvoir spatialiser l'information thermique contrairement aux mesures *in situ* ponctuelles et de permettre de cartographier de manière détaillée la température de surface de l'eau. L'imagerie infrarouge thermique ouvre des possibilités intéressantes pour l'étude des structures thermiques des cours d'eau à plusieurs échelles (Wawrzyniak, 2012).

À l'échelle spatiale la plus large, la télédétection IRT permet d'obtenir des profils longitudinaux de températures de l'eau plus détaillés que ceux obtenus avec des thermomètres *in situ*. L'imagerie IRT permet de travailler sur des linéaires de cours d'eau de plusieurs

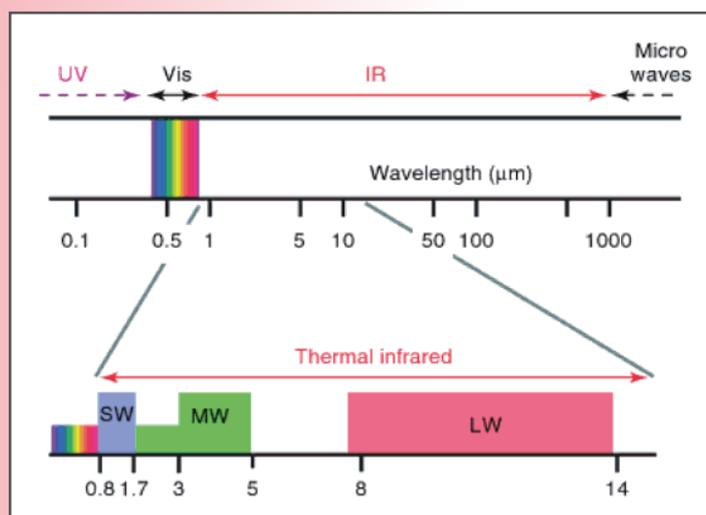


Figure 22. Infrarouge (IR) et régions spectrales adjacentes. L'infrarouge thermique (IRT entre 0,8-14 μm) est composé de l'IR proche (SW shortwave), moyen (MW mid-wave) et lointain (LW long-wave) (Vollmer et Möllmann, 2010).

centaines de kilomètres. Contrairement à la télédétection aéroportée, l'imagerie satellitaire rend possible l'étude des variations temporelles saisonnières et inter-annuelles. En effet, l'accès souvent gratuit aux données satellites à faible résolution spatiale, comme c'est le cas pour Landsat, et la fréquence d'acquisition élevée permettent d'aborder des questions en lien avec la saisonnalité ou la variabilité hydrologique.

À une échelle plus locale, l'IRT permet ainsi de détecter les échanges hyporhéiques et de localiser les zones d'arrivées phréatiques dans les rivières ou les bras morts. En été, les eaux souterraines étant généralement plus froides que les rivières, des arrivées phréatiques peuvent créer des zones d'eau plus froide, considérées comme des refuges thermiques pour certaines espèces de poissons.

■ Protocole de mesure des échanges

Les 100 premiers microns de la surface de l'eau émettent une radiation IRT qu'il est possible de mesurer à l'aide de capteurs. La procédure est la suivante :

- ✓ choisir un capteur (encarts : Matériel et protocole) dont la résolution est adaptée au cours d'eau étudié (au moins trois pixels sur la largeur du cours d'eau) ;
- ✓ choisir une période de l'année où le contraste thermique entre les eaux souterraines et superficielles est suffisant (environ 5°C) ; pour la localisation des arrivées phréatiques, il est ainsi conseillé de travailler en été en fin de journée lorsque la température de la rivière est particulièrement élevée ;
- ✓ faire l'acquisition à l'étiage car un débit trop élevé masquerait les échanges ;
- ✓ choisir une période de beau temps (sans nuage, ni brouillard) et sans vent trop fort (pour faciliter le vol) ;
- ✓ implanter des thermomètres enregistreurs dans les cours d'eau où la température est homogène spatialement (par ex. zone de seuils où l'eau est bien mélangée) en évitant les zones où il y a stratification thermique ;

L'essentiel du protocole

1. Acquisition des images IRT et installation de thermomètres de référence *in situ*
2. Géoréférencement des images
3. Correction de la mesure de température
4. Identification des zones en eau
5. Création d'un profil longitudinal de température et/ou identification des anomalies thermiques (comparaison de zones et identification des zones plus chaudes ou froides).

Dispositifs / matériel

Matériel

Images satellitaires

Noms de satellites : Landsat 7, Terra, Aqua, Noaa...

Résolution spatiale thermique : 60 à 1000 m en fonction de la sensibilité des capteurs

Fréquence de passage : d'ordre de grandeur hebdomadaire (varie selon les satellites). Toujours à la même heure (par ex. tous les 16 jours pour Landsat 7, vers 10h20GMT pour le Rhône).

Toutes les images satellites ne sont pas forcément exploitables. C'est le cas notamment en cas de couverture nuageuse ou de capteurs défectueux.

Images aéroportées

Hélicoptère, avion, ULM ou drone (photos 8)

Caméra thermique (photo 9)

Résolution : 0,1 à 5 m en fonction de l'altitude de vol et de la matrice de la caméra thermique

Sondes enregistreuses de température de l'eau

Logiciel

SIG

Téledétection

Prise de notes

Carnet de terrain / Fiche de terrain

Crayon papier et gomme



Photos 8.

Trois des vecteurs aéroportés utilisés ;
a : le drone Drelio ;
b : l'hélicoptère Robinson R22 et
c : le para-moteur.

© plateforme IS/G



Photo 9.

a : caméras IRT VarioCAM® hr head et **b** : hr research.

© Infratec

- ✓ acquérir des photographies ou images dans le visible pour faciliter le géoréférencement et l'interprétation des images thermiques ;
- ✓ transformer le format propriétaire des images IRT en un format lisible par les logiciels de téledétection et SIG ;
- ✓ géoréférencer des images IRT à l'aide des photographies aériennes ou images dans le visible ;
- ✓ corriger la mesure de température : corrections atmosphériques, calibration en utilisant des données de température *in situ*, estimation de l'erreur ;
- ✓ sélectionner des pixels du chenal pour établir un profil thermique longitudinal ;
- ✓ extraire la température dans différentes zones pour identification des différences thermiques.

Les coûts (hommes/jours) sont précisés dans le tableau 14.

Tableau 14. Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour les images thermiques infrarouges (IRT).

Tâches	Temps	Coût (nb de personnes par jour)
Pose des sondes thermiques	10 à 20 sondes / jour	2
Acquisition d'images IRT aéroportées	50 km/heure	1
Géoréférencement des images	20 images / jour	1
Correction de la mesure de T°	0,5 jour	1
Calcul de la T°	0,5 jour	1

■ Interprétation des données et des résultats

Il est essentiel de valider l'identification des anomalies thermiques, en se servant des images dans le visible. En effet, des objets différents peuvent avoir la même signature thermique. Par ex. une ombre sur un banc de galets peut présenter la même température qu'une arrivée phréatique d'eau froide. Il est ainsi indispensable d'utiliser les images dans le visible ou photographies aériennes pour identifier les entités exondées telles les bancs de galets ou la végétation, et s'assurer que l'anomalie thermique identifiée est bien une zone en eau et non un artefact dû aux conditions d'acquisition des images.

La température des cours d'eau varie au cours du temps. Une image thermique est ainsi une représentation instantanée d'un état transitoire. Il est indispensable de tenir compte des changements temporels de température dans l'interprétation des images (par ex. moment de la journée).

■ Valeurs guides et repères

- ▶ Infrarouge thermique (0,8-14 μm), composé de l'infrarouge thermique moyen (3-5 μm) et de l'infrarouge thermique lointain (8-14 μm)
- ▶ Émissivité (ϵ) : eau 0,98 à 0,99 ; sol minéral sec 0,92 à 0,94 ; végétation verte et en bonne santé 0,96 à 0,99
- ▶ Spectre électromagnétique du visible : 0,4-0,8 μm
- ▶ Résolution spatiale des capteurs des satellites : 60 à 1000 m, couverture globale
- ▶ Résolution spatiale des images aéroportées : 0,1 à 5 m (varie selon les caméras et l'altitude de vol)
- ▶ Emprise au sol des images aéroportées : 50x40 à 2000x1500 m (varie selon les caméras et l'altitude de vol)
- ▶ Matrice des images IRT : 640 x 480 pixels (varie selon les caméras)

■ Résultats : exemple de l'Ain

La figure 23 montre des anomalies thermiques de la température de l'eau de l'Ain en période estivale (Wawrzyniak *et al.*, 2016). Ces zones sont liées aux échanges nappe/rivière. Elles sont froides car elles sont alimentées par des eaux souterraines. Les principaux types d'anomalies observées sont : **a**/les bras morts froids et **b**/les résurgences. Les bras froids sont d'anciens chenaux abandonnés ou des basses de convexités. Les résurgences sont situées sur les bords du cours d'eau et résultent du drainage de la nappe d'accompagnement.

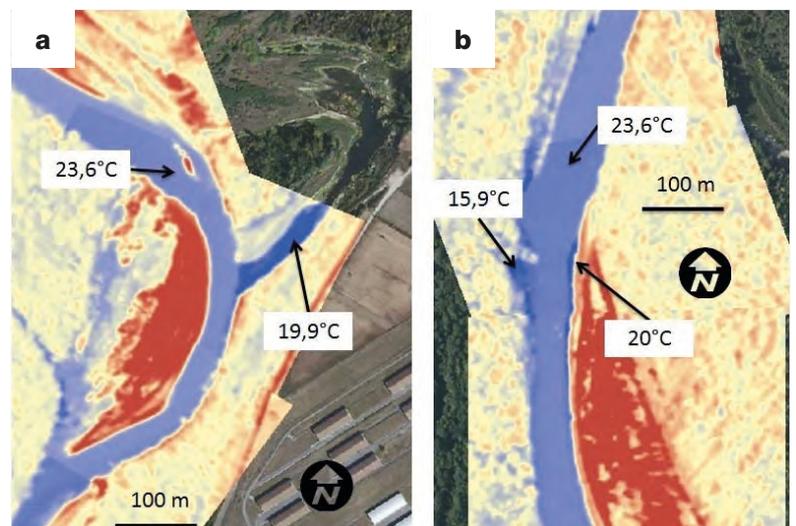


Figure 23. Anomalies thermiques estivales sur l'Ain ; **a** : bras mort froid et **b** : résurgence latérale. Le fond est une orthophoto de 2012.

Ces anomalies thermiques présentent une variabilité temporelle liée aux conditions de nappe. Ainsi, le nombre de résurgences apparaît fortement corrélé au niveau de la nappe alors que les bras morts froids montrent une plus grande stabilité temporelle.

■ Points forts

- ▶ Possibilité d'obtenir une cartographie de la température de surface
- ▶ Finesse de la résolution spatiale, notamment avec des images aéroportées
- ▶ Importance de l'emprise spatiale étudiée
- ▶ Rapidité de l'acquisition de données

■ Informations et données nécessaires

- ▶ Images IRT
- ▶ Photographies aériennes ou images dans le visible
- ▶ Températures de la rivière *in situ* pour calibration

■ Points faibles, conditions d'utilisation, prérequis

- ▶ Nécessite une différence importante de température entre les eaux de surface et les eaux souterraines
- ▶ Ne détecte que les apports de nappe à la rivière (ou aux bras morts) et les apports hyporhéiques (par le fond du lit)
- ▶ Bien tenir compte des différentes sources d'erreurs de l'imagerie IRT des cours d'eau : émissivité de la surface de l'eau, réflexions de radiations environnantes, rugosité de l'eau, stratifications thermiques à la fois aux niveaux microscopiques et macroscopiques
- ▶ Privilégier une observation la plus verticale possible (peu d'influence pour des angles inférieurs à 30° / beaucoup pour de angles supérieurs à 70°) pour limiter la réflexion des nuages et des objets terrestres riverains
- ▶ Tenir compte des incertitudes liées à la calibration de la caméra thermique (dérive possible pendant les mesures)
- ▶ En parallèle de l'acquisition thermique, obtenir une couverture d'images visibles, de même résolution spatiale et couvrant la même surface
- ▶ Pour les acquisitions aéroportées, plusieurs facteurs peuvent affecter le vol : conditions aérologiques, législation aérienne (zones protégées, sites sensibles telles les centrales nucléaires)

■ Méthodes complémentaires

- ▶ Analyse géomatique des niveaux d'eau (fiche outils n°1)
- ▶ Modèles hydrogéologiques (fiche outils n°2)
- ▶ Végétation aquatique (fiche outils n°6)
- ▶ Invertébrés souterrains (fiche outils n°7)

Références et liens pour en savoir plus

Dugdale S.J., Bergeron N.E., St-Hilaire A. (2013) *Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river*. Remote Sensing of Environment, 136, p. 358-373.

Handcock R.N., Gillespie A.R., Cherkauer K.A., Kay J.E., Burges S.J., Kampf S.K. (2006) *Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales*. Remote Sensing of Environment, 100, p. 427-440.

Torgersen C.E., Faux R.N., McIntosh B.A., Poage N.J., Norton D.J. (2001) *Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams*. Remote Sensing of Environment, 76(3), p. 386-398.

Vollmer M., Möllmann K.P. (2010). *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 593 p.

Wawrzyniak V. (2012) *Étude multi-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie infrarouge thermique : exemples dans le bassin du Rhône*. Thèse de doctorat de Géographie et d'Aménagement, Université Lyon 3.

Wawrzyniak V., Piégay H., Allemand P., Grandjean P., Goma R. (2015) *Characterization of thermal refuges along the lower Ain River using thermal infrared remote sensing: implications for conservation and restoration*. IS.Rivers, Integrative Sciences and sustainable development of rivers. Lyon, 22-26 juin 2015

Wawrzyniak V., Piégay H., Allemand P., Vaudor L., Goma R., Grandjean P. (2016). *Effects of geomorphology and groundwater level on the spatio-temporal variability of riverine cold water patches assessed using thermal infrared (TIR) remote sensing*. Remote Sensing of Environment, 175, p. 337-348.

Personnes ressources

Vincent Wawrzyniak (Géographe) : Université de Lyon, CNRS-UMR 5600 EVS. ENS de Lyon, Plateforme ISIG, vincent.wawrzyniak@gmail.com

Hervé Piégay (Géographe) : Université de Lyon, CNRS-UMR 5600 EVS. ENS de Lyon, Plateforme ISIG, Herve.Piegay@ens-lyon.fr